第39卷 第2期
2022年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 39 No. 2
Mar. 2022

咸海流域降水时空特征及趋势分析

王浩轩[1]， 黄 峰[1,2]， 郭利丹[2,3]， 钟瑞森[4]

（1. 河海大学水文水资源学院，江苏 南京 210098；2. 河海大学国际河流研究中心，江苏 南京 211100；3. 河海大学商学院，江苏 南京 211100；4. 中国科学院新疆生态与地理研究所，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘 要： 基于CRU（Climate Research Unit）数据集1945—2019年咸海流域月降水序列，利用气候倾向率、集中度与分摊熵、样本熵与排列熵方法，分别分析了咸海流域年降水量变化、降水的年内分配、降水序列复杂性变化的时空特征，并用Mann-Kendall法检验了各方法所得结果的趋势性。结果表明：咸海流域年降水量总体基本保持不变，呈微弱的上升趋势，其中，流域西北部及中东部区域降水量呈显著上升的趋势；咸海流域降水集中于每年的3月左右，降水的年内分配有微弱的均匀化趋势，流域西部、北部及东部降水年内分配相对更均匀，流域中部及南部降水年内分配相对更集中；咸海流域西部、北部及东部降水序列的复杂性相对较高，中部及南部降水序列的复杂性相对较低，流域整体的降水序列的复杂性呈一定的上升趋势，其中，流域北部与南部降水序列的复杂性呈显著下降的趋势，流域西部、中部与东部降水序列的复杂性呈显著上升的趋势。

关键词： 咸海流域；降水；年际变化；年内分配；复杂性

降水的时空分布及变化趋势是气候变化的重要表征，在全球变暖的背景下，降水的变化特征受到众多学者的关注[1]，尤其在干旱半干旱区，降水的时空分布及其变化趋势影响着当地生态环境的变化与演替[2-3]。中亚是全球最大的干旱区之一，咸海流域是中亚诸流域中有代表性的流域。长期以来，咸海流域诸国为了经济发展无限制取水[4]，加之水资源利用不合理，缺乏有效监管协调机制[5]，大规模的工农业及生活用水使得入湖水量锐减，咸海水位急剧下降，面积急剧萎缩[5-6]。咸海的平均水位从1945年的52.78 m下降至2018年的33.70 m，共减少了19.08 m，水面面积从1960年的6.85×10^4 km^{2}下降至2018年的0.83×10^4 km^2，共减少了6.02×10^4 km^2（87.88%），水体盐分从1960年的约10 g·L^{-1}增为21世纪初的70 g·L^{-1}，生态环境严重受损，造成举世瞩目的"生态灾难"[7-9]。"咸海危机"其本质上为咸海水资源补给量与消耗量的严重失衡，急剧减少的径流难以平衡湖泊水量的蒸发[10]，因此，在近年来咸海流域内农业种植结构改革、耕地面积减少、灌溉效率提高、农业用水趋于稳定的前提下[11]，降水作为流域水资源补给的重要来源[8]，研究其变化及其引起的水资源量和时空分布的变化，对探索"咸海危机"的成因及解决办法具有重要的现实意义与科学价值。

国内外学者已基于滑动平均、距平分析、相关性分析等方法对中亚地区的气候变化做了深入研究，但大部分针对咸海地区的研究区域集中在咸海湖泊本身[8-9]或其子流域[12-13]，针对咸海全流域的研究相对较少。本文对咸海全流域降水量、年内分配变化及复杂性进行分析，得到了降水在不同国家的时空分布特征，结果可为各国水资源合理开发利用、生态环境保护等提供科学依据。

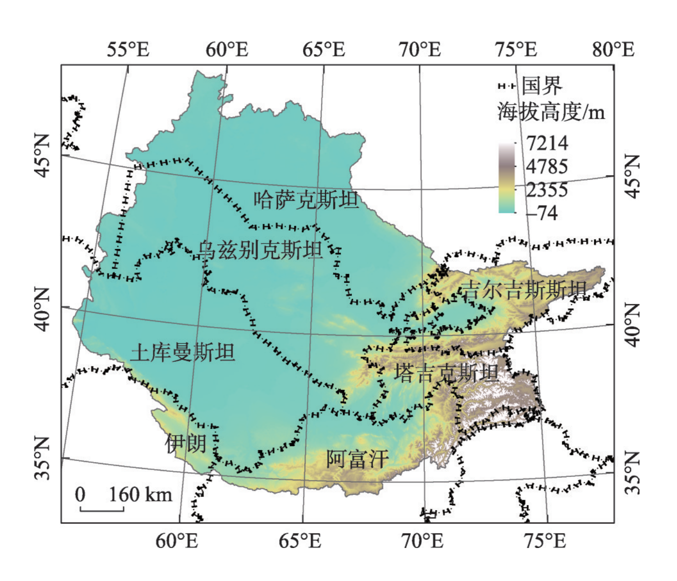
1 数据与方法

1.1 研究区概况

咸海流域包括吉尔吉斯斯坦、哈萨克斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦、土库曼斯坦、阿富汗与伊朗7个国家的部分或全部领土。咸海流域东起天山山脉与帕米尔高原，西抵图兰平原西部，南起兴都库什山脉，北达哈萨克丘陵[1]，流域面积达到170×

收稿日期： 2021-07-16； **修订日期：** 2021-09-07
基金项目： 中亚地区咸海危机中的博弈与合作（2020.E-002）；国家自然科学基金（42071049）
作者简介： 王浩轩（1997-），男，硕士研究生，研究方向为生态水文. E-mail: 465412917@qq.com
通讯作者： 黄峰. E-mail: huangfeng1987@hhu.edu.cn

10^4 km^2(图1)。自然地理风貌上,大致南部为荒漠、绿洲与山区,北部为草原、平原与丘陵[14],地貌单元呈现出多样化的特点。



注:底图采用自然资源部标准地图制作,审图号为GS(2020)4393号,对底图边界无修改。下同。

图1 咸海流域

Fig. 1 The Aral Sea Basin

1.2 数据来源

咸海流域1945—2019年的降水数据从CRU TS v4.04 (https://data.ceda.ac.uk/badc/cru/data/cru_ts/cru_ts_4.04)收集整理,数据的空间分辨率为0.5°×0.5°。CRU数据集能较好地描述中亚地区的气候变化特征,有较高的可信度[15]。所用的降水空间分布数据完全覆盖整个流域边界。

1.3 研究方法

利用气候倾向率定量描述咸海流域降水的变化率[16];利用集中期与集中度定量描述降水的集中时段与集中程度[17-20];利用分摊熵评价降水年内分配的均匀程度[21];利用样本熵与排列熵定量描述降水序列的复杂性[22-26];对于上述方法计算产生的集中期、集中度、分摊熵、样本熵与排列熵序列,基于Mann-Kendall法分析其趋势性。

1.3.1 气候倾向率 气候倾向率(Climate Tendency Rate)用一次线性方程表示气候要素长期趋势变化的方向和程度[16]。某地区的降水倾向率越大,表明该地区的降水变化越快越明显。

1.3.2 集中期、集中度与分摊熵 集中度(Concentration Degree)与集中期(Concentration Period)是利用向量原理定义时间分配特征的参数,是评价区域水文气象序列不均匀性的重要指标之一[17-18]。集中度越大,降水越集中。该指标可为抗洪防汛、灌溉决策及水资源调度等规划提供支撑[20]。

分摊熵(Apportion Entropy)是评价水文、气象序列均匀性的重要指标之一。分摊熵值越大,表示降水的年内分配越均匀,当每月的降水量占全年的1/12时,分摊熵取最大值;分摊熵值越小,表示降水的年内分配越不均匀,当全年的降水集中在一个月时,分摊熵取最小值。

1.3.3 样本熵与排列熵 样本熵(Sample Entropy)是一种通过度量信号产生新波动的概率大小来衡量时间序列复杂性的方法[22-23]。样本熵值越小,说明时间序列越简单,样本熵值越大,说明时间序列越复杂。取重构维数m=2,阈值r为0.15倍的时间序列标准差[22-23]。

排列熵(Permutation Entropy)是一种检验动力学突变和时间序列随机性的方法[24-25]。排列熵值越小,时间序列越简单,排列熵值越大,时间序列越复杂。取嵌入维数m=6,延迟时间t=1[24-26]。

进行时间序列分析时,由于上述两种方法对序列长度有要求,取滑动窗口长度t为20 a,即240个月,每次滑动长度Δt取12个月,则将75 a的降水序列划分为56个时段,即1945—1964年、1946—1965年、…、2000—2019年。

1.3.4 Mann-Kendall检验法 Mann-Kendall(M-K)检验法是一种广泛应用于水文与气象数据趋势性检验的方法[27-28]。对于检验统计量Z,当$Z>0$时,表示所检验序列呈上升趋势,当$Z<0$时,表示所检验序列呈下降趋势。当Z的绝对值大于等于1.64、1.96与2.58时,分别表示通过了0.10、0.05与0.01显著性水平的检验,即检验结果分别具有90%、95%与99%的置信度。

2 结果与分析

2.1 年降水量变化特征

咸海流域年降水量变化如图2所示。咸海流域1945—2019年多年平均降水量为250.8 mm,最小年降水量175.6 mm,最大年降水量390.0 mm。咸海流域年降水量M-K趋势检验的Z值为1.41,未通过90%的显著性水平检验,表明咸海流域年降水量在研究期间基本保持稳定,呈一定的上升趋势。

咸海流域多年平均降水量空间分布如图3所

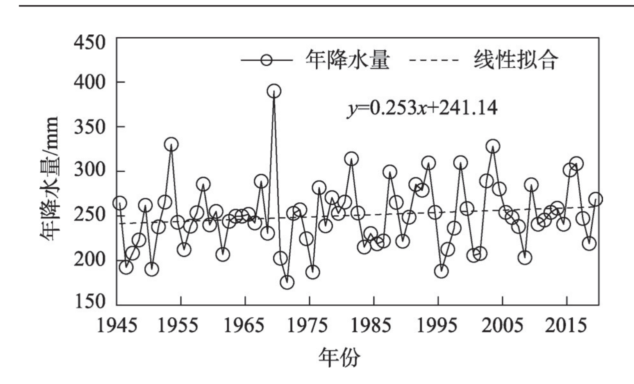


图2　咸海流域年降水量变化

Fig. 2　Annual precipitation changes in the Aral Sea Basin

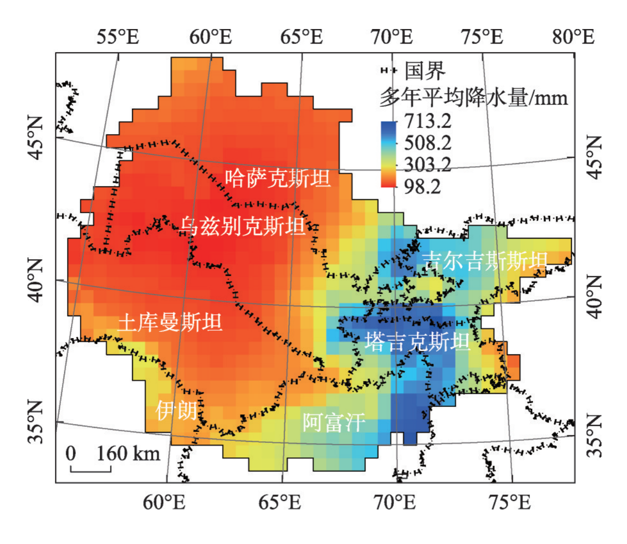


图3　咸海流域多年平均降水量分布

Fig. 3　Spatial distribution of multi-year average precipitation in the Aral Sea Basin

示。从流域整体看，降水量空间分布差异较大，东部多于西部、南部多于北部。从国家间分布看，哈萨克斯坦南部、乌兹别克斯坦中西部及土库曼斯坦东北部降水量相对较低，吉尔吉斯斯坦西部、塔吉克斯坦中西部及阿富汗东北部降水量相对较高。

咸海流域年降水量倾向率分布如图4所示，图中阴影部分表示年降水量的变化显著，通过了95%水平的显著性检验。降水变化显著的区域主要集中在乌兹别克斯坦西北部、哈萨克斯坦西南部与塔吉克斯坦中西部，阿富汗北部与吉尔吉斯斯坦东部有少量分布，且降水变化显著区域的降水倾向率值均大于0，表明这些区域的降水量呈显著上升的趋势。

2.2　降水年内分配特征

咸海流域逐年降水集中期变化及多年平均集中期分布如图5所示。从空间分布看，咸海流域降水的集中期空间差异较大，中部与南部降水集中期

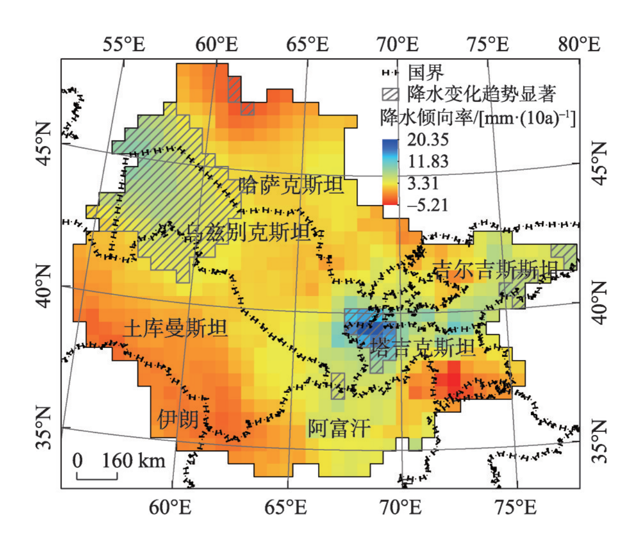
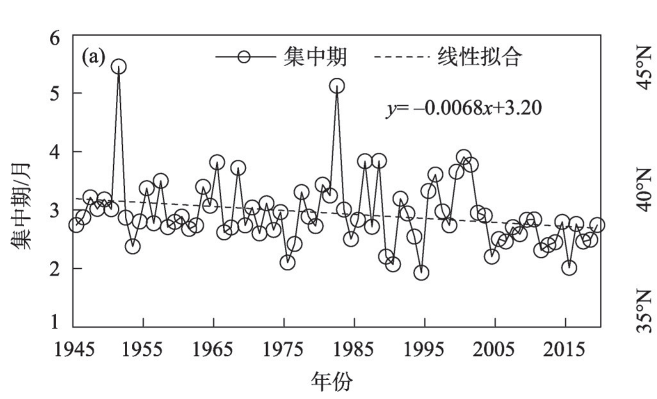


图4　咸海流域年降水量变化倾向率空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of annual precipitation tendency rate in the Aral Sea Basin



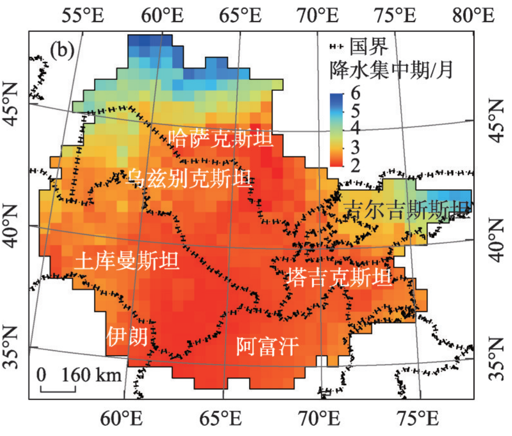


图5　咸海流域逐年降水集中期变化及多年平均集中期分布

Fig. 5　Annual variation of precipitation concentration period and the spatial distribution of mean precipitation concentration period in the Aral Sea Basin

数值较小，多为2—3月，说明这些区域以冬春季降水为主；北部与东部降水集中期数值较大，多为5—6月，说明这些区域以夏季降水为主。从时间变化看，咸海流域降水集中期M-K趋势检验的Z值为-2.94，通过了99%水平的显著性检验，表明整个流域的降水集中时段有显著提前的趋势。

咸海流域降水的年内分配情况如图6所示。流域内降水总量呈现出明显的单峰型分布，其中3月降水量最多，为42.8 mm，占全年降水量的17.13%，其次4月和2月对降水的贡献率分别为15.28%与12.20%，与图5a集中期多处于3月左右相符合；8月降水量最少，为3.1 mm，仅占全年降水量的1.24%。作物生长期(4—9月)的降水量仅占全年降水量的34.54%，而非生长期(10月—次年3月)的降水量占全年降水量的65.46%。

咸海流域逐年降水集中度及分摊熵变化如图7所示。降水的集中度与分摊熵序列的M-K趋势检验的Z值分别为-0.25与1.51，二者均未通过90%水平的显著性检验，表明研究时段内咸海流域降水的年内分配基本保持稳定，有微弱的均匀化趋势。

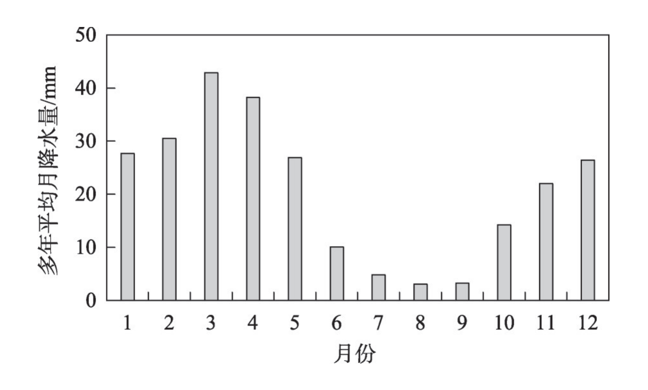
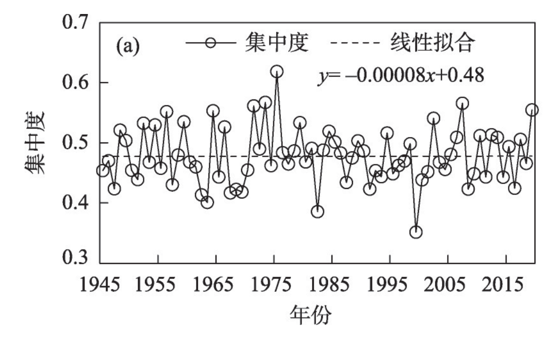


图6 咸海流域多年平均月降水量

Fig. 6 Multi-year average monthly precipitation in the Aral Sea Basin

咸海流域降水量的多年平均集中度空间分布如图8a所示。从流域整体看，降水的多年平均集中度空间分布差异较大。从国家间分布看，阿富汗西北部及土库曼斯坦东南部降水序列的集中度值相



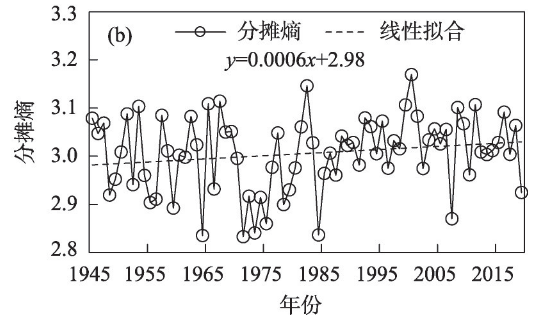


图7 咸海流域逐年降水集中度与分摊熵变化

Fig. 7 Changes in precipitation concentration and sharing entropy in the Arak Sea Basin

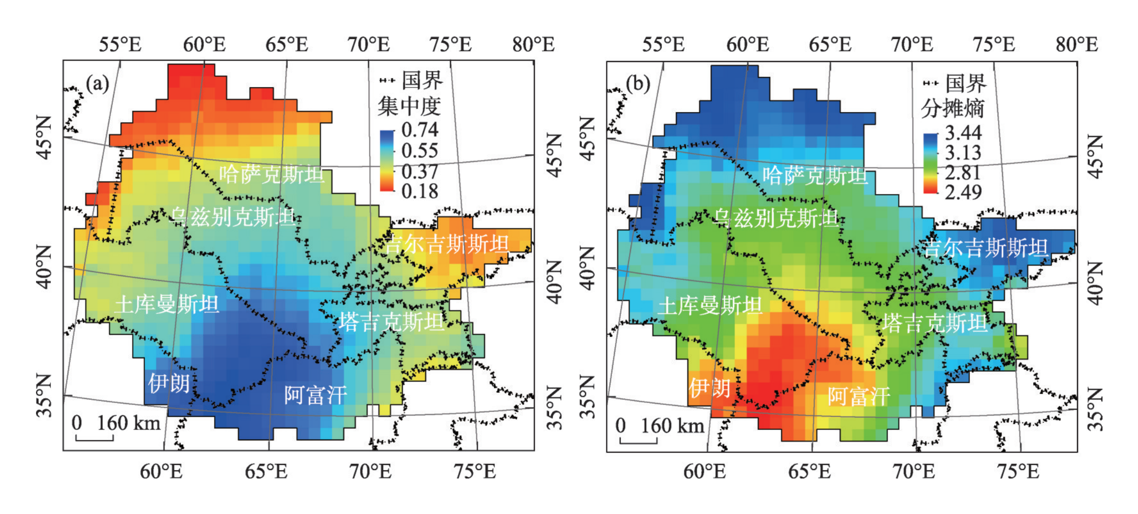


图8 咸海流域降水量多年平均集中度与分摊熵空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of average concentration degree and sharing entropy of precipitation in the Aral Sea Basin

对较大,说明这些区域降水量年内分配相对较为集中;乌兹别克斯坦西北部、哈萨克斯坦西南部及吉尔吉斯斯坦中部降水序列的集中度值相对较小,说明这些区域降水量年内分配相对较为均匀。

咸海流域降水量的多年平均分摊熵空间分布如图8b所示。降水分摊熵呈现出与图8a降水集中度反向分布的特征,其中阿富汗西北部及土库曼斯坦东南部降水序列的分摊熵值相对较小,说明这些区域降水年内分配相对较为集中;乌兹别克斯坦西北部、哈萨克斯坦西南部及吉尔吉斯斯坦中部降水序列的分摊熵值相对较大,说明这些区域降水量年内分配相对较为均匀。

2.3 降水序列复杂性变化特征

咸海流域降水序列的样本熵与排列熵的空间分布如图9所示。降水序列的复杂性是降水量大小变化的一个细节表征,其表现于影响降水的要素在时间和空间上的多样性,如果降水量大小变化频繁、无规律性明显,则降水序列的复杂性高,反之则低[29]。从流域整体看,降水序列的样本熵与排列熵的空间分布相似,流域中部及南部降水序列的样本熵与排列熵值相对较低,说明该地区降水序列的复杂性与不确定性相对较低,降水序列的变化更加规律,对于降水的预测较为容易;流域西部、北部及东部降水序列的样本熵与排列熵值相对较高,说明该地区降水序列的复杂性与不确定性相对较高,更不易分辨出其变化趋势与变化规律,对于降水的预测较为困难。

咸海流域逐时段降水的样本熵与排列熵变化如图10所示。降水的样本熵与排列熵序列M-K趋势检验的Z值分别为0.64与3.25,样本熵序列未通过90%水平的显著性检验,排列熵序列通过了99%水平的显著性检验,表明咸海流域降水序列的复杂性随着时间的推移具有一定的上升趋势。样本熵与排列熵时间序列的变化呈现出明显的阶段性,样本熵序列表现出减—增—平稳—减的变化特征,其中,1945—1978年,样本熵呈明显的波动下降趋势,

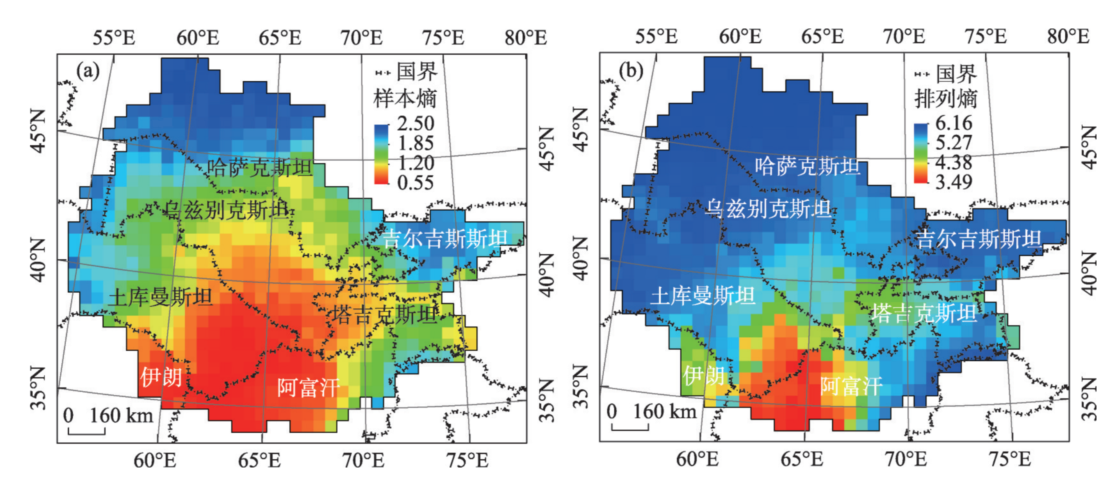


图9 咸海流域月降水序列样本熵与排列熵空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of sample entropy and permutation entropy of monthly precipitation series in the Aral Sea Basin

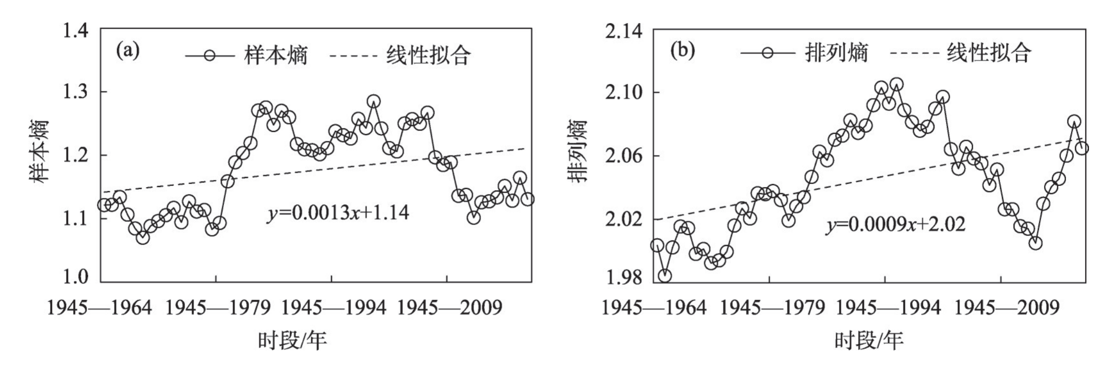


图10 咸海流域降水序列样本熵与排列熵变化

Fig. 10 Changes in sample entropy and permutation entropy of precipitation series in the Aral Sea Basin

1959—1984年，样本熵发生明显突变，样本熵值快速增大，1965—1998年，样本熵基本保持稳定，1979—2019年，样本熵呈明显的波动下降趋势；排列熵序列表现出增—平稳—减的变化特征，其中，1945—1992年，样本熵呈明显的波动上升趋势，在1973—2001年，样本熵基本保持稳定，1982—2019年，样本熵呈波动下降趋势。综合两者的变化特征可以认为，20世纪70年代左右，咸海流域降水序列的随机性和复杂性较高，20世纪80年代中期及以后，咸海流域降水序列的不确定性和无序性有所下降，规律性和可预测性有所增强。

咸海流域逐时段降水序列的样本熵与排列熵的变化率空间分布如图11所示，图中阴影部分表示降水序列的样本熵或排列熵变化显著；由于样本熵或排列熵变化趋势的数量级较小，在图中为易区分出梯度，将变化趋势值乘以10。样本熵变化率的空间分布表现为流域北部与东南部为负值，流域西部、中部与东北部为正值；排列熵变化率的空间分布表现为流域南部与北部为负值，流域西部、中部与东部为正值。综合两者变化率的空间分布可以认为塔吉克斯坦中东部、阿富汗东北部、哈萨克斯坦西南部与乌兹别克斯坦西北部降水序列的复杂性与不确定性呈降低趋势；土库曼斯坦中部、乌兹别克斯坦东南部与哈萨克斯坦东南部降水序列的复杂性与不确定性呈升高趋势。

咸海流域上游国家（吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦与阿富汗）的多年平均降水量明显多于下游国家（哈萨克斯坦、乌兹别克斯坦与土库曼斯坦），上下游国家的产流量分别为87.1%与12.9%[4]，而咸海流域用水主要集中在下游的乌兹别克斯坦、哈萨克斯坦与土库曼斯坦的平原灌区[14]，水资源空间分布不均背景下的人类活动更是激化了突出的水资源供需矛盾与生态脆弱的问题[30-31]。咸海流域逐年降水量呈一定的上升趋势，降水量的增加有助于缓解水资源的供需矛盾；水热不同期是咸海流域典型的气候特征[32]，除吉尔吉斯斯坦东部与哈萨克斯坦南部的少数区域外，流域内大部分地区的降水集中在3月左右，而农作物生长期的4—9月降水量占比很小[33]，尤其对于下游缺水国家，作物生长期时主要依靠上游山区冰雪融水发展灌溉农业，这对上下游各国水资源的优化配置提出了较高要求。咸海流域降水序列的复杂性表现出较大空间差异，北部（土库曼斯坦西北部、乌兹别克斯坦西部、哈萨克斯坦南部与吉尔吉斯斯坦）大于南部（塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦中东部、土库曼斯坦东南部与阿富汗北部），说明南部降水量的影响因子对其影响相对较小，彼此之间影响程度较弱，导致其降水系统复杂性相对较弱；而北部降水的影响因子相对较多，彼此之间相互影响，造成了其降水系统结构复杂性相对较强，降水的变化更加不规律，使这些区域的降水预测工作更为困难[34]，各国应根据实际情况制定本国的水资源开发政策，加强国家间合作和流域水资源统一管理。

3 结 论

本文基于1945—2019年咸海流域逐月降水序列，分析了咸海流域降水的时空变化特征，主要结

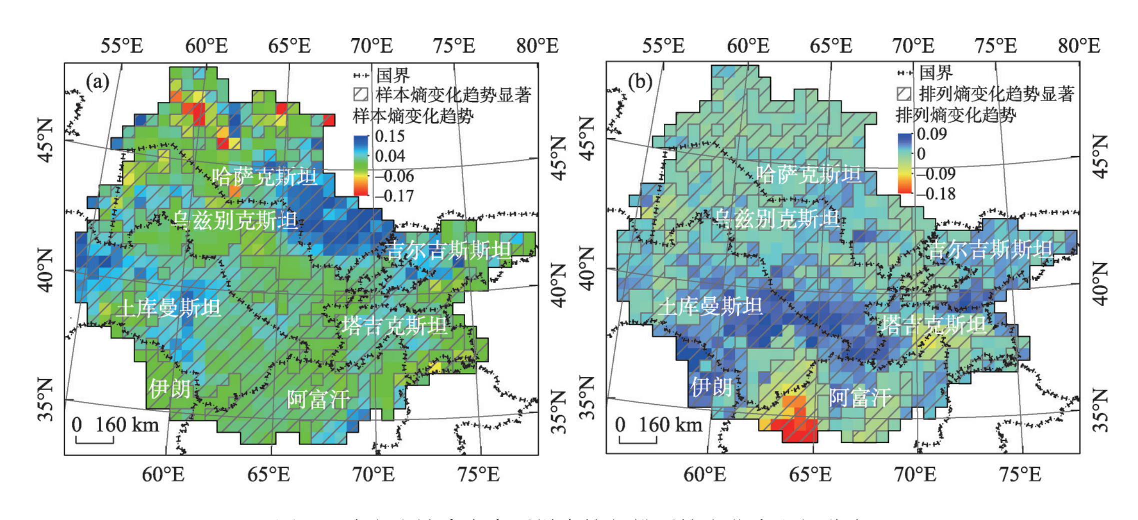


图11 咸海流域降水序列样本熵与排列熵变化率空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of sample entropy and permutation entropy change rate of precipitation series in the Aral Sea Basin

论如下:

(1)流域东南部的高原与山区降水量相对丰富,西北部的平原干旱区降水量相对匮乏。流域内多年平均降水量为250.8 mm,流域各年降水量呈一定的上升趋势。其中,乌兹别克斯坦西北部、哈萨克斯坦西南部、塔吉克斯坦中西部、阿富汗北部与吉尔吉斯斯坦东部的少量区域降水量呈显著上升的趋势。

(2)采用集中期与集中度、分摊熵评价了降水年内分配的集中时段与均匀程度。集中期表明咸海流域降水主要集中于每年的3月左右,有显著的提前趋势。集中度与分摊熵表明咸海流域降水量年内分配基本保持稳定,有微弱的均匀化趋势,其中流域西部、北部及东部降水年内分配相对均匀,流域中部及南部降水年内分配相对集中。

(3)采用样本熵与排列熵评价了流域月降水序列的复杂性。从整个流域看,东部、西部与北部降水序列的复杂性大于中部与南部,说明东部、西部与北部的降水量变化更不规律、复杂性相对较高,中部与南部降水序列的复杂性与不确定性则相对较低。流域整体降水序列的复杂性呈一定的升高趋势,其中,塔吉克斯坦中东部、阿富汗东北部、哈萨克斯坦西南部与乌兹别克斯坦西北部降水序列的复杂性与不确定性呈下降趋势;土库曼斯坦中部、乌兹别克斯坦东南部与哈萨克斯坦东南部降水序列的复杂性与不确定性呈增强趋势。

参考文献(References):

[1] 徐利岗, 杜历, 姚海娇, 等. 中亚干旱区降水时空变化特征及趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2015, 29(11): 121-127. [Xu Ligang, Du Li, Yao Haijiao, et al. Spatiotemporal variations and tendency of annual precipitation in the arid Central Asia[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2015, 29(11): 121-127.]

[2] Lioubimtseva E, Colea R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia[J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62(11): 285-308.

[3] Lioubimtseva E, Henebry G M, Climate and environmental change in arid Central Asia: Impacts, vulnerability and adaptions[J]. Journal of Arid Environments, 2009, 73(11): 963-977.

[4] 邓铭江, 龙爱华. 中亚各国在咸海流域水资源问题上的冲突与合作[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1376-1390. [Deng Mingjiang, Long Aihua. Water resources issue among the Central Asia countries around the Aral Sea: Conflict and cooperation[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1376-1390.]

[5] 邓铭江, 龙爱华. 咸海流域水文水资源演变与咸海生态危机出路分析[J]. 冰川冻土, 2011, 33(6): 1363-1375. [Deng Mingjiang, Long Aihua. Evolution of hydrologic and water resources and ecological crisis in the Aral Sea Basin[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2011, 33(6): 1363-1375.]

[6] Wurtsbaugh W A, Miller C, Null S E, et al. Decline of the world's saline lakes[J]. Nature Geoscience, 2017, 10(11): 816-821.

[7] Micklin P. The Aral Sea disaster[J]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2007, 35: 47-72.

[8] 陈起川, 夏自强, 郭利丹, 等. 中亚湖泊地区降水量变化特征及趋势分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(6): 13-16. [Chen Qichuan, Xia Ziqiang, Guo Lidan, et al. Variation characteristics and trend analysis of precipitation in Central-Asia lake zones[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(6): 13-16.]

[9] 杨雪雯, 王宁练, 陈安安, 等. 中亚干旱区咸海面积变化与人类活动及气候变化的关联研究[J]. 冰川冻土, 2020, 42(2): 681-692. [Yang Xuewen, Wang Ninglian, Chen An'an, et al. The relationship between area variation of the Aral Sea Basin in the arid Central Asia and human activities and climate change[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2020, 42(2): 681-692.]

[10] 昝婵娟, 黄粤, 李均力, 等. 1990—2019年咸海水量平衡及其影响因素分析[J]. 湖泊科学, 2021, 33(4): 1265-1275. [Zan Chanjuan, Huang Yue, Li Junli, et al. Analysis of water balance in Aral Sea and the influencing factors from 1990 to 2019[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4): 1265-1275.]

[11] Wegerich K, Van R D, Soliev I, et al. Water security in the Syr Darya Basin[J]. Water, 2015, 7(9): 4657-4684.

[12] Jiang L, Jiapaer G, Bao A, et al. Assessing land degradation and quantifying its drivers in the Amudarya River Delta[J]. Ecological Indicators, 2019, 107: 105595.

[13] Schar C, Vasilina L, Pertziger F, et al. Seasonal runoff forecasting using precipitation from meteorological data assimilation systems [J]. Journal of Hydrometeorology, 2004, 5(5): 959-973.

[14] 邓铭江, 龙爱华, 章毅, 等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1347-1356. [Deng Mingjiang, Long Aihua, Zhang Yi, et al. Assessment of water resources development and utilization in the five Central Asia countries[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(12): 1347-1356.]

[15] 黄秋霞, 赵勇, 何清. 基于CRU资料的中亚地区气候特征[J]. 干旱区研究, 2013, 30(3): 396-403. [Huang Qiuxia, Zhao Yong, He Qing. Climate characteristics in Central Asia based on CRU data [J]. Arid Zone Research, 2013, 30(3): 396-403.]

[16] 刘斌涛, 陶和平, 宋春风, 等. 1960—2009年中国降雨侵蚀力的时空变化趋势[J]. 地理研究, 2013, 32(2): 245-256. [Liu Bintao, Tao Heping, Song Chunfeng, et al. Temporal and spatial variations of rainfall erosivity in China during 1960 to 2009[J]. Geographical Research, 2013, 32(2): 245-256.]

[17] 李斌, 王莉. 基于降水集中度和集中期的关中地区降水时空变化特征分析[J]. 陕西水利, 2020, 89(2): 36-41. [Li Bin, Wang Li.

Analysis on spatial and temporal variation characteristics of precipitation in Guanzhong Area based on precipitation concentration ratio and precipitation concentration period[J]. Shaanxi Water Resources, 2020, 89(2): 245–256.]

[18] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 843–853. [Zhang Tianyu, Cheng Bingyan, Wang Jifang, et al. Temporal and spatial change characteristics of precipitation concentration degree (PCD) and precipitation concentration period (PCP) over north China in rainy reason[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 843–853.]

[19] 张欣然. 辽东暴雨洪水易发区降水集中度及集中期时空变化特征分析[J]. 水利规划与设计, 2020, 33(6): 74–78, 107. [Zhang Xinran. Analysis of spatial and seasonal variation of precipitation concentration degree and period in storm flood prone zones in eastern Liaoning province[J]. Water Resources Planning and Design, 2020, 33(6): 74–78, 107.]

[20] 付浩龙, 刘凤丽, 李亚龙, 等. 降水集中度分析及其在水稻灌溉决策中的应用——以湖北省漳河灌区为例[J]. 水利与建筑工程学报, 2020, 18(4): 35–40. [Fu Haolong, Liu Fengli, Li Yalong, et al. Rice irrigation decision-making based on precipitation concentration: A case study of Zhanghe irrigation district in Hubei Province[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2020, 18(4): 35–40.]

[21] 周文婧, 夏自强, 黄峰, 等. 巴尔喀什湖流域降水量及其年内分配的变化特征[J]. 水电能源科学, 2013, 31(6): 10–13. [Zhou Wenjing, Xia Ziqiang, Huang Feng, et al. Variation characteristics of precipitation and its annual distribution in Balkhash Lake Basin [J]. Water Resources and Power, 2013, 31(6): 10–13.]

[22] Huang F, Chunyu X Z, Wang Y K, et al. Investigation into multi-temporal scale complexity of stream flows and water levels in the Poyang Lake basin, China[J]. Entropy, 2017, 19(2): 67–67.

[23] 王远坤, 李建, 王栋. 基于多尺度熵理论的葛洲坝水库对长江干流径流影响研究[J]. 水资源保护, 2015, 31(5): 14–18. [Wang Yuankun, Li Jian, Wang Dong. Research on impacts of Gezhouba Reservoir on Yangtze River main stream runoff based on multi-scale entropy theory[J]. Water Resources Protection, 2015, 31(5): 14–18.]

[24] 孙东永, 黄强, 张莉. 基于排列熵和小波分析的渭河降水突变研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(4): 229–234. [Sun Dongyong, Huang Qiang, Zhang Li. Precipitation mutation of Wei River based on permutation entropy and wavelet analysis[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2015, 43(4): 229–234.]

[25] 侯威, 封国林, 董文杰, 等. 利用排列熵检测近40年华北地区气温突变的研究[J]. 物理学报, 2006, 40(5): 2663–2668. [Hou Wei, Feng Guolin, Dong Wenjie, et al. A technique for distinguishing dynamical species in the temperature time series of north China [J]. Acta Physica Sinica, 2006, 40(5): 2663–2668.]

[26] 何兵, 高凡, 闫正龙, 等. 叶尔羌河径流演变规律与变异特征[J]. 水资源与水工程学报, 2018, 29(1): 38–43, 49. [He Bing, Gao Fan, Yan Zhenglong, et al. Evolution and variation of runoff in Yarkant River[J]. Journal of Water Resources & Water Engineering, 2018, 29(1): 38–43, 49.]

[27] 曹洁萍, 迟道才, 武立强, 等. Mann-Kendall检验方法在降水趋势分析中的应用研究[J]. 农业科技与装备, 2008, 29(5): 35–37, 40. [Cao Jieping, Chi Daocai, Wu Liqiang, et al. Mann-Kendall examination and application in the analysis of precipitation trend[J]. Agricultural Science & Technology and Equipment, 2008, 29(5): 35–37, 40.]

[28] 黄峰, 夏自强, 王远坤. 长江上游枯水期及10月径流情势分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(2): 129–133. [Huang Feng, Xia Ziqiang, Wang Yuankun. Runoff regimes of upstream Yangtze River in dry season and October[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010, 38(2): 129–133.]

[29] 张茜, 梁秀娟, 肖长来. 多值粗粒化Lempel-Ziv算法在吉林省降水变化复杂度分析中的应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2017, 25(1): 28–36. [Zhang Qian, Liang Xiujuan, Xiao Changlai. Application of multiple coarse-grained Lempel-Ziv algorithm to analyze complexity of precipitation in Jilin Province[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2017, 25(1): 28–36.]

[30] Chen F H, Huang W, Jin L Y, et al. Spatiotemporal precipitation variations in the arid Central Asia in the context of global warming [J]. Science China Earth Sciences, 2011, 54(12): 1812–1821.

[31] 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 西北干旱区水资源问题研究思考[J]. 干旱区地理, 2012, 35(1): 1–9. [Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. Ponder on the issues of water resources in the arid region of northwest China[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(1): 1–9.]

[32] 胡汝骥, 姜逢清, 王亚俊, 等. 中亚(五国)干旱生态地理环境特征[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 1–12. [Hu Ruji, Jiang Fengqing, Wang Yajun, et al. Arid ecological and geographical conditions in five countries of Central Asia[J]. Arid Zone Research, 2014, 31(1): 1–12.]

[33] 郭利丹, 周海炜, 夏自强, 等. 丝绸之路经济带建设中的水资源安全问题及对策[J]. 中国人口·资源与环境, 2015, 25(5): 114–121. [Guo Lidan, Zhou Haiwei, Xia Ziqiang, et al. Water resources security and its countermeasure suggestions in building Silk Road Economic Belt[J]. China Population, Resources and Environment, 2015, 25(5): 114–121.]

[34] 付强, 李铁男, 李天霄, 等. 基于近似熵理论的三江平原月降水量空间复杂性分析[J]. 水土保持研究, 2015, 22(2): 113–116, 122. [Fu Qiang, Li Tienan, Li Tianxiao, et al. Analysis of spatial complexity of monthly precipitation in Sanjiang Plain based on approximate entropy[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2015, 22(2): 113–116, 122.]

Analysis of tempo-spatial characteristics and trends of precipitation in the Aral Sea Basin

WANG Haoxuan[1], HUANG Feng[1,2], GUO Lidan[2,3], ZHONG Ruisen[4]

(1. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China; 2. International River Research Centre, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 3. Business School of Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China; 4. Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, Xinjiang, China)

Abstract: In this study, we extracted regional precipitation data of the general Aral Sea Basin in Central Asia from the Climate Research Unit (CRU) from 1945 to 2019. Simultaneously, we also calculated the spatial and temporal characteristics of annual precipitation change using the climate trend rate method. We first depicted the overall spatial distribution of the climate trend rate, then we used concentration period, concentration degree, and sharing entropy methods to describe the precipitation distribution, and separately depicted the spatial and temporal precipitation distribution. Additionally, we calculated the spatial and temporal change in precipitation complexity using the sample entropy and permutation entropy methods, and demonstrated these results graphically. Trends in the new series of concentration period, concentration degree, sharing entropy, sample entropy, and permutation entropy were tested using the Mann-Kendall method. Generally, the annual precipitation in the Aral Sea Basin in Central Asia remained largely unchanged, whereas precipitation showed a slight upward trend. From the perspective of spatial distribution, precipitation increased significantly in the northwest and central east of the Aral Sea Basin in Central Asia. Furthermore, precipitation was mainly concentrated in early and mid-February for each year. The general precipitation distribution showed a slightly homogenized trend, whereas the annual precipitation distribution was more uniform in the west, north, and east of the Aral Sea Basin, and more concentrated in the middle and south of the Aral Sea Basin. Moreover, the sample entropy and permutation entropy values were higher in the north, west, and east, but lower in the south and middle of the Aral Sea Basin. Altogether, the results demonstrate that the complexity of the precipitation series was relatively high in the north, west, and east, but relatively low in the south and middle of the Aral Sea Basin in Central Asia. The complexity of the precipitation series in the whole basin generally showed an upward trend. More specifically, the complexity of the precipitation series in the north and south of the basin showed a significant downward trend, whereas in the west, middle, and east of the basin, it showed a significant upward trend. Our results illustrate the variation in precipitation characteristics in this basin over the past 75 years, and provide a scientific basis for the development and utilization of water resources in the Aral Sea Basin in Central Asia.

Keywords: the Aral Sea Basin; precipitation; inter-annual variability; intra-annual distribution; complexity